

Perhitungan Gangguan Simultan Hubungan Seri-Seri Pada Sistem Tenaga Listrik

Triwahju Hardianto

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Jl.Slamet Riyadi No.62 Jember - 68111

No. Fax / Telp. : 0331-484977

e-mail : triwahju@yahoo.com

Abstract

Paper ini menjelaskan tentang bagaimana menghitung besar arus dan tegangan pada sebuah interkoneksi sistem tenaga listrik bila terjadi dua buah gangguan yang terjadi secara bersama (simultan). Pembahasan perhitungan gangguan simultan ini dibatasi pada terjadinya gangguan simultan tipe seri dengan seri untuk gangguan tidak seimbang. Dari hasil simulasi dan perhitungan dapat diperoleh bahwa gangguan simultan satu fasa ketanah dengan satu fasa ketanah sangat besar arus gangguannya, disamping itu juga mengakibatkan penurunan tegangan disemua fasa sangat signifikan...

Keywords: Gangguan tak simetri, jaringan dua-pintu, trafo penggeser fasa, gangguan simultan, analisa simpul.

Perhitungan Gangguan Simultan Hubungan Seri-Seri Pada Sistem Tenaga Listrik

Abstrak

Paper ini menjelaskan tentang bagaimana menghitung besar arus dan tegangan pada sebuah interkoneksi sistem tenaga listrik bila terjadi dua buah gangguan yang terjadi secara bersama (simultan). Pembahasan perhitungan gangguan simultan ini dibatasi pada terjadinya gangguan simultan tipe seri dengan seri untuk gangguan tidak seimbang. Dari hasil simulasi dan perhitungan dapat diperoleh bahwa gangguan simultan satu fasa ketanah dengan satu fasa ketanah sangat besar arus gangguannya, disamping itu juga mengakibatkan penurunan tegangan disemua fasa sangat signifikan..

Keywords: Gangguan tak simetri, jaringan dua-pintu, trafo penggeser fasa, gangguan simultan, analisa simpul.

1. Pendahuluan

Dengan semakin besarnya suatu sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi, maka semakin kompleks pula gangguan-gangguan yang mungkin akan terjadi. Diantara gangguan seri dan shunt yang terjadi secara tunggal, maka tidak menutup kemungkinan gangguan akan terjadi secara simultan yang dapat mengakibatkan bahaya dan kerusakan sistem peralatan baik pada penyedia tenaga listrik maupun pihak konsumen.

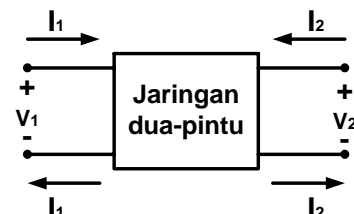
Pada paper ini dijelaskan perhitungan arus dan tegangan gangguan yang terjadi secara simultan untuk gangguan-gangguan tak simetri hubungan seri dengan seri. Adapun kombinasi gangguan yang mungkin terjadi adalah gangguan satu fasa ketanah dan dua saluran terbuka. Kedua kombinasi ini disebut juga sebagai gangguan tipe Z, karena menggunakan perhitungan impedansi pada rangkaian terminalnya.

Metode yang digunakan untuk menyelesaikan perhitungan besar arus-arus gangguan dan tegangan pada setiap bus digunakan metode jaringan dua-pintu (*Two-Port Network*). [1], [2]. Metode ini akan diterapkan pada sebuah sistem interkoneksi empat bus [3] untuk mengetahui besar arus dan tegangan gangguan yang terjadi.

2. Metode Jaringan Dua-Pintu

Metode yang digunakan disini adalah metode

jaringan dua pintu seperti ditunjukkan pada gambar 1, dimana terdapat dua pasang terminal disebelah kiri atau pintu 1 dan disebelah kanan atau pintu 2. Dalam gambar tersebut tampak bahwa pada pintu satu dan pintu 2 arus mengalir masuk pada terminal atas dan meninggalkan rangkaian pada terminal bawah.



Gambar 1. Jaringan dua-pintu.

2.1 Rangkaian Dua-Pintu dengan sumber internal

Kita asumsikan terdapat sumber bebas pada rangkaian dua-pintu. Masing-masing sumber akan mempengaruhi outputnya dengan tidak melibatkan hubungan eksternal pada rangkaian dua-pintu. Jika rangkaian dua-pintu terpisah, sumber bebas internal akan menyebabkan terukurnya tegangan rangkaian terbuka atau arus-arus hubung singkat pada terminal-terminal dua-pintu. Untuk sumber bebas pada parameter-parameter Z didapat:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Z1} \\ V_{Z2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

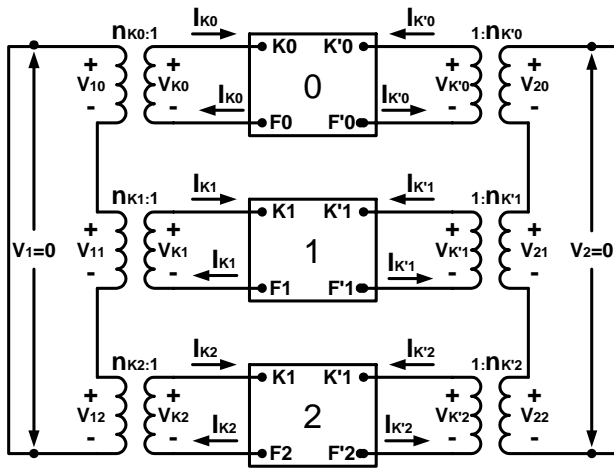
Pada persamaan (1) diatas untuk menentukan matriks Z dengan menghilangkan sumber-sumber bebas internal, yaitu dengan cara menghubungkan singkat semua sumber tegangan bebas dan merangkai terbuka semua sumber arus bebas dalam rangkaian.

2.2 Hubungan Gangguan Simultan Tipe Z Terhadap Rangkaian Urutan Positif, Negatif dan Nol

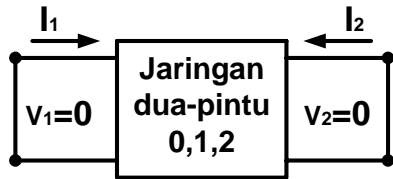
Pada paper ini dijelaskan perhitungan arus dan gangguan yang terjadi secara simultan untuk gangguan-gangguan tak simetri hubungan seri dengan seri. Adapun kombinasi gangguan yang mungkin terjadi adalah

gangguan satu fasa ketanah dan dua saluran terbuka. Kedua kombinasi ini disebut juga sebagai gangguan tipe Z, karena menggunakan parameter perhitungan impedansi pada rangkaian terminalnya.

Pada gambar 2 terlihat hubungan rangkaian untuk gangguan tipe seri dan seri. Rangkaian urutan nol, positif dan negatif ditunjukkan sebagai rangkaian satu-pintu (one-port) dengan arah arus selalu masuk pada rangkaian terminal K dan meninggalkan rangkaian di terminal F pada pintu 1. Kemudian gangguan simultan pada pintu 2, rangkaian urutan nol, positif dan negatif ditunjukkan dengan arah arus selalu masuk pada rangkaian terminal K' dan meninggalkan rangkaian di terminal F'.



(a) Hubungan Jaringan Lengkap



(b) Hubungan Jaringan yang disederhanakan

Figure 2. Hubungan Jaringan Urutan untuk Gangguan Simultan Tipe Seri dan Seri.

Transformasi-transformasi pada gambar 2 menunjukkan transformator penggeser fasa yang dikehendaki pada berbagai rangkaian gangguan yang terjadi. Transformator penggeser fasa ini adalah ideal, sehingga rasio transformasinya didefinisikan sebagai:

$$n_{Ki} = \frac{V_{1i}}{V_{Ki}} = \frac{I_{1i}}{I_{Ki}} \quad (2)$$

dan

$$n_{K'i} = \frac{V_{2i}}{V_{K'i}} = \frac{I_{21i}}{I_{K'i}} \quad (3)$$

Besaran selalu diberikan dengan i sama dengan 0, 1, 2 urutan nol, positif dan negatif. Harga-harga n selalu 1, a, atau a^2 , seperti terinci dalam definisi fasa simetri pada tabel 1.

Tabel 1. Definisi fasa simetri

Lokasi Gangguan	Fasa Penggeser		
	n0	n1	n2
a atau b-c	1	1	1
b atau c-a	1	a^2	a
c atau a-b	1	a	a^2

2.3 Hubungan Seri-Seri (Gangguan Tipe Z)

Hubungan seri-seri dari rangkaian urutan *two-port* diperoleh:

1. Gangguan simultan satu fasa ke tanah (SLG) pada titik F dan F'.
2. Gangguan simultan satu fasa ke tanah (SLG) pada titik F dan dua saluran terbuka (2LO) pada titik F'.
3. Gangguan simultan dua saluran terbuka (2LO) pada titik F dan satu fasa ke tanah (SLG) pada titik F'.
4. Gangguan simultan dua saluran terbuka (2LO) pada titik F dan F'.

Pada hubungan rangkaian urutan yang ditunjukkan pada gambar 2, untuk rangkaian positif diperoleh:

$$\begin{bmatrix} V_{K1} \\ V_{K'1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11(1)} & Z_{12(1)} \\ Z_{21(1)} & Z_{22(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{K1} \\ I_{K'1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Z1} \\ V_{Z2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

dimana $\begin{bmatrix} V_{Z1} \\ V_{Z2} \end{bmatrix}$ adalah sumber bebas disisi terminal K_1 - F_1

dan K'_1 - F'_1 (sisi sekunder trafo). Dengan $i = 1$, maka

$$n_{K1} = \frac{V_{11}}{V_{K1}} = \frac{I_{11}}{I_{K1}} \quad (5)$$

Dan

$$n_{K'1} = \frac{V_{21}}{V_{K'1}} = \frac{I_{211}}{I_{K'1}} \quad (6)$$

Perkalian persamaan untuk rangkaian urutan positif

dengan $\begin{bmatrix} n_{K1} & 0 \\ 0 & n_{K'1} \end{bmatrix}$ diperoleh:

$$\begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11(1)} & \frac{n_{K1}}{n_{K'1}} Z_{12(1)} \\ \frac{n_{K'1}}{n_{K1}} Z_{21(1)} & Z_{22(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{K1} V_{Z1} \\ n_{K'1} V_{Z2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Untuk rangkaian urutan negatif diperoleh:

$$\begin{bmatrix} V_{K2} \\ V_{K'2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11(2)} & Z_{12(2)} \\ Z_{21(2)} & Z_{22(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{K2} \\ I_{K'2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Perkalian persamaan untuk rangkaian urutan negatif dengan $\begin{bmatrix} n_{K2} & 0 \\ 0 & n_{K'2} \end{bmatrix}$ diperoleh:

$$\begin{bmatrix} V_{12} \\ V_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11(2)} & \frac{n_{K2}}{n_{K'2}} Z_{12(2)} \\ \frac{n_{K'2}}{n_{K2}} Z_{21(2)} & Z_{22(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{12} \\ I_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dan untuk rangkaian urutan nol diperoleh:

$$\begin{bmatrix} V_{K0} \\ V_{K'0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11(0)} & Z_{12(0)} \\ Z_{21(0)} & Z_{22(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{K0} \\ I_{K'0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Perkalian persamaan untuk rangkaian urutan nol dengan $n_{K0} = n_{K'0} = 1$

$$\begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11(0)} & Z_{12(0)} \\ Z_{21(0)} & Z_{22(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{10} \\ I_{20} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Dari gambar 2 untuk hubungan seri dengan seri, maka:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{12} \\ V_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

dan

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{12} \\ I_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{10} \\ I_{20} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Dari dua persamaan terakhir diatas,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{K1} V_{Z1} \\ n_{K'1} V_{Z2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

dimana

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{11(0)} + Z_{11(1)} + Z_{11(2)} \\ Z_{12} &= Z_{12(0)} + \frac{n_{K1}}{n_{K'1}} Z_{12(1)} + \frac{n_{K2}}{n_{K'2}} Z_{12(2)} \\ Z_{21} &= Z_{21(0)} + \frac{n_{K'1}}{n_{K1}} Z_{21(1)} + \frac{n_{K'2}}{n_{K2}} Z_{21(2)} \\ Z_{22} &= Z_{22(0)} + Z_{22(1)} + Z_{22(2)} \end{aligned} \quad (15)$$

Persamaan diatas dapat ditulis

$$V = 0 = ZI + V_s$$

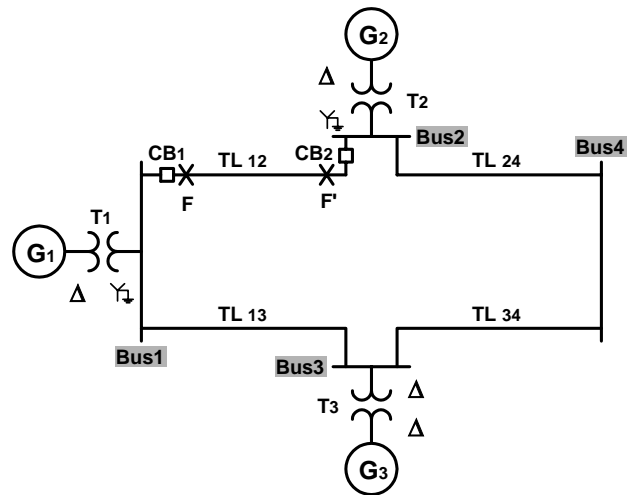
$$I = -Z^{-1}V_s$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{-1}{\text{DET } Z} \begin{bmatrix} Z_{22} & -Z_{12} \\ -Z_{21} & Z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{K1} V_{Z1} \\ n_{K'1} V_{Z2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

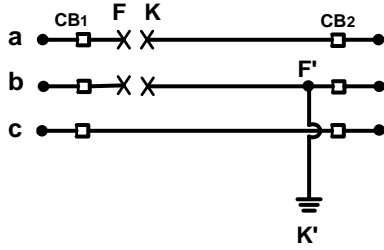
Dalam bentuk ini dapat diperoleh bahwa arus pada masing-masing gangguan tergantung pada sumber tegangan bebas pada kedua lokasi gangguan.

3. Penerapan Metode Jaringan Dua-Pintu

Pada bagian ini akan dicoba contoh permasalahan yang terjadi pada sebuah interkoneksi sistem 4 bus [3] dengan mengabaikan adanya beban di bus 4. Gangguan yang terjadi adalah dua saluran terbuka di bus 1 ditandai dengan titik F dan gangguan hubung singkat satu fasa ketanah pada bus 2 ditandai dengan titik F' seperti ditunjukkan pada gambar 3. Sedangkan pada gambar 4 menunjukkan hubungan rangkaian gangguan simultan dengan posisi fasa-fasa a, b dan c pada bus 1 dan bus 2 yang terganggu.



Gambar 3. Sistem Interkoneksi 4 bus.



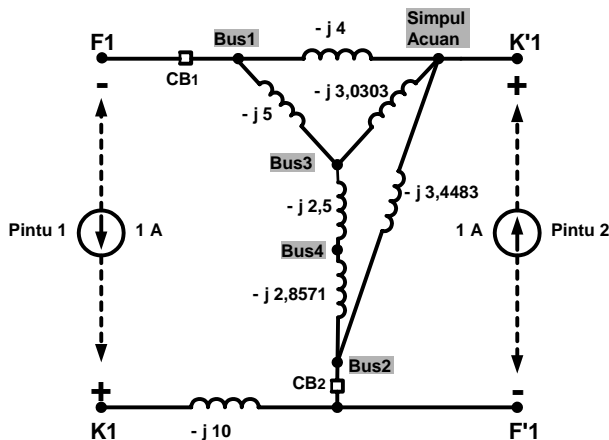
Gambar 4. Fasa-fasa yang terganggu.

Untuk harga-harga komponen pada interkoneksi sistem 4 bus ditunjukkan seperti dalam tabel 2 [3] dengan mengabaikan adanya beban di bus 4 dalam perhitungan gangguan.

Tabel 2. Harga komponen sistem 4 bus

Komponen	Base MVA	Base KV _{LL}	X ₁ pu	X ₂ pu	X ₀ pu
G ₁	100	230	0.15	0.15	
G ₂	100	230	0.20	0.20	
G ₃	100	230	0.25	0.25	
T ₁	100	230	0.10	0.10	0.10
T ₂	100	230	0.09	0.09	0.09
T ₃	100	230	0.08	0.08	0.08
TL ₁₂	100	230	0.10	0.10	0.36
TL ₁₃	100	230	0.20	0.20	0.60
TL ₂₄	100	230	0.35	0.35	1.05
TL ₃₄	100	230	0.40	0.40	1.20

Dengan menggunakan analisa simpul, dan memasang arus 1 A pada pintu 1, dan pintu 2 dihubung terbuka seperti pada gambar 5 dan gambar 6, maka diperoleh besar impedansi Z₁₁ dan Z₂₁ (persamaan 18).

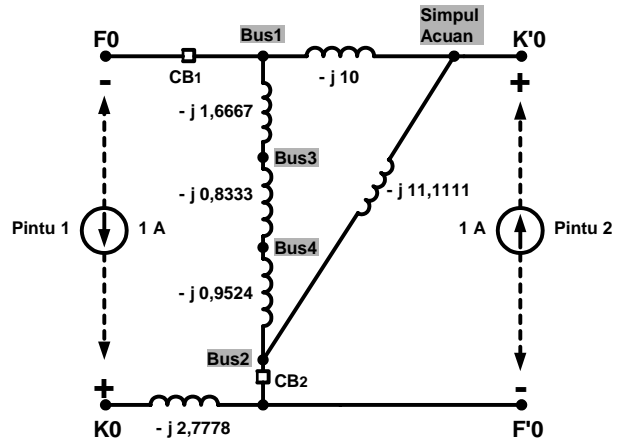


Gambar 5. Rangkaian Admitansi Urutan Positif dan Negatif Pada Jaringan Dua-Pintu.

Selanjutnya juga dengan menggunakan analisa simpul, dan memasang arus 1 A pada pintu 2, dan pintu 1 dihubung terbuka pada gambar 5 dan gambar 6, maka diperoleh besar impedansi Z₁₂ dan Z₂₂ (persamaan 19). Perhitungan impedansi disini dilakukan dengan cara menyusun matriks admitansi bus pada gambar 5 dan 6. Dengan menyelesaikan matriks persamaan :

$$[I] = [Y][V] \quad (17)$$

kita akan memperoleh impedansi driving point pada seluruh rangkaian urutan nol, positif dan negatif setelah menset arus 1 ampere baik di pintu 1 dan pintu 2.



Gambar 6. Rangkaian Admitansi Urutan Nol Pada Jaringan Dua-Pintu.

$$Z_{11(0,1,2)} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{I_2=0} \quad Z_{21(0,1,2)} = \frac{V_2}{I_1} \Big|_{I_2=0} \quad (18)$$

$$Z_{12(0,1,2)} = \frac{V_1}{I_2} \Big|_{I_1=0} \quad Z_{22(0,1,2)} = \frac{V_2}{I_2} \Big|_{I_1=0} \quad (19)$$

Setelah memperoleh impedansi pada tiap-tiap rangkaian urutan, kita akan melakukan perhitungan untuk memperoleh impedansi total seperti pada persamaan (15). Perhitungan dilakukan dengan memasukkan rasio transformasi transformator penggeser fasa sesuai dengan posisi fasa gangguan pada tabel 1. Untuk gangguan dua saluran terbuka fasa a dan b, maka rasio transformasinya adalah $n_{k0} = 1$, $n_{k1} = a$, $n_{k2} = a^2$. Dan pada gangguan hubung singkat satu fasa ketanah pada fasa b, rasionya adalah $n_{k'0} = 1$, $n_{k'1} = a^2$, $n_{k'2} = a$.

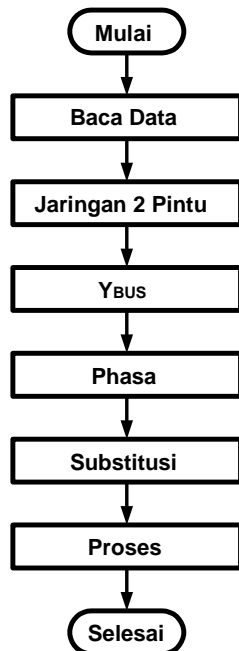
Selanjutnya kita perlu mencari besaran nilai V_{Z1} dan V_{Z2} untuk menyelesaikan persamaan 16, sehingga diperoleh nilai I₁ dan I₂ pada kedua titik gangguan. Nilai V_{Z1} dan V_{Z2} diperoleh dengan tetap memasang sumber-sumber internal bebas pada rangkaian urutan positif. Sumber-sumber internal ini dimasukkan dengan asumsi

nilai $1\angle 0^\circ$ volt pada bus-bus generator yaitu bus 1, bus 2 dan bus 3. Dengan melakukan analisa simpul pada rangkaian admitansi urutan positif yang sudah dihubungkan dengan sumber-sumber internal, maka nilai V_{Z1} dan V_{Z2} akan kita peroleh.

Akhirnya setelah menyelesaikan persamaan (16), berdasarkan gambar 2 untuk hubungan gangguan seri dengan seri kita mencatat bahwa untuk menghitung ketiga arus fasa kita dapat menggunakan persamaan (13) dengan mudah dengan tetap memperhatikan rasio transformasi transformator penggeser fasa.

Sedangkan untuk mendapatkan tegangan disetiap bus pada sistem interkoneksi, dilakukan dengan menempatkan arus-arus urutan I_{k0} dan $I_{k'0}$ pada rangkaian admitansi dua pintu urutan nol, I_{k1} dan $I_{k'1}$ pada rangkaian admitansi dua pintu urutan positif dan I_{k2} dan $I_{k'2}$ pada rangkaian admitansi dua pintu urutan negatif seperti pada gambar 5 dan gambar 6 dengan analisa simpul dan penyelesaian superposisi untuk urutan positif karena terdapat sumber-sumber bebas dalam jaringannya.

Adapun diagram alir dari perhitungan gangguan dengan metode dua-pintu dapat ditunjukkan seperti pada gambar 7. Dimana blok baca data adalah membaca data input dan memilih lokasi gangguan simultan yang dianalisa. Jaringan 2 Pintu adalah blok diagram yang menempatkan arus 1 Ampere di pintu 1 dan pintu 2.



Gambar 7. Diagram Alir Perhitungan Jaringan Dua-Pintu.

Blok Y_{BUS} adalah menyusun matriks admitansi bus urutan nol, positif dan negatif. Blok Phasa adalah menentukan rasio transformasi pada fasa-fasa bus

terganggu. Blok Substitusi adalah melakukan proses perhitungan tegangan dari persamaan $[I] = [Y][V]$. Dan diakhiri dengan blok proses adalah menghitung hasil akhir dari arus dan tegangan titik gangguan dan arus-arus yang mengalir disemua saluran dan tegangan disemua bus.

Hasil Perhitungan Metode Jaringan Dua-Pintu.

Dari hasil perhitungan keempat jenis kombinasi gangguan simultan pada bus 1 dan bus 2, diperoleh hasil seperti pada tabel 3 berikut:

Tabel 3. Hasil Perhitungan Arus dan Tegangan Akibat Gangguan Simultan

Gangguan Simultan	I_a	I_b	I_c	V_a	V_b	V_c
Bus1-2LO(a,b)	0	0	115	226	205	220
Bus2-SLG(b)	0	1444	0	206	0	212
Bus1-SLG(a)	2278	0	0	0	100	183
Bus2-SLG(b)	0	2120	0	88	0	173
Bus1-SLG(a)	2330	0	0	0	214	214
Bus2-2LO(b,c)	607	0	0	104	214	214
Bus1-2LO(a,b)	0	0	0	230	230	230
Bus3-2LO(b,c)	0	0	0	230	230	230

Catatan: Satuan arus dalam A dan tegangan dalam kV.

4. Kesimpulan

Teknik perhitungan gangguan simultan dengan metode jaringan dua-pintu ini mempunyai kelebihan bahwa parameter arus dan tegangan pada semua sistem yang terinterkoneksi dapat dicari dengan mudah dengan melibatkan teknik perhitungan analisa simpul dan superposisi dalam jaringannya. Dari hasil perhitungan tampak bahwa gangguan simultan hubung singkat satu fasa ke tanah dengan satu fasa ke tanah sangat besar arus gangguannya, disamping itu mengakibatkan penurunan tegangan disemua fasa sangat signifikan.

References

- [1] P.M. Anderson, "Analysis of Simultaneous Faults by Two Port Network Theory", Trans. IEEE, PAS 90 (Sept./Oct.), pp. 2199-2205 1971.
- [2] P.M. Anderson, "Analysis of Faulted Power System", IEEE Press Power System Engineering Series, 1995.
- [3] T. Gonen, "Electric Power Transmission System Engineering", John Wiley & Sons, 1988.
- [4] J.J. Grainger and W.D. Stevenson, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1994.
- [5] W.H.Hayt, J.E.Kemmerly, "Rangkaian Listrik", Erlangga, 1995.